

Aplicación de la energía solar fotovoltaica a los sistemas de protección ferroviarios por pasos a nivel

Juan de Dios Sanz Bobi. España
juandedios.sanz@upm.es

Roberto Loiero. España
citef-rloiero@industriales.upm.es

Actualmente existe un gran número de pasos a nivel en la red convencional española. La principal limitación de estos elementos de protección es la falta de un suministro eléctrico viable principalmente por el alto coste que supone alimentar algunas zonas. Este documento propone un sistema de suministro eléctrico por medio de la energía solar fotovoltaica que permita obtener beneficios tanto económicos como ambientales. La solución tendría un impacto positivo sobre todo en zonas lejanas de los centros de distribución, donde el suministro tradicional mediante cable es difícil de proporcionar, y además respetaría el medio ambiente, ya que no se necesitan conductores para el transporte de energía de la red de distribución pública hasta la instalación del paso a nivel. El sistema propuesto se puede implementar fácilmente y se puede adaptar a cualquier tipología de protección.

1. Introducción.

La presencia de las instalaciones de paso a nivel para señalización y protección es importante y necesaria tanto desde el punto de vista del ferrocarril como para el tráfico de vehículos y personas a través de estos. El sistema de señalización está constituido por un número de elementos tanto acústicos como luminosos y de barreras, con el fin de evitar que personas y vehículos invadan la vía ocupada por un tren. Todo este sistema de protección presenta la particularidad de que es una instalación independiente de la del control de trenes, y por lo tanto puede ser considerada como una instalación aislada del sistema de alimentación ferroviario. Por otro lado, la mayor limitación para los pasos a nivel es que su instalación supone una inversión considerable debido a la acometida eléctrica desde la red pública, sobre todo en aquellas zonas lejanas a la red de distribución. En algunas localizaciones, la instalación de un nuevo paso a nivel puede ser poco rentable debido al hecho que el tráfico de trenes y de vehículos o personas es débil. En este caso el paso se deja muchas veces sin proteger porque la inversión no se justifica y tiene como consecuencia el riesgo de accidentes que en algunas ocasiones puede conllevar la pérdida de vidas humanas. Considerando además el nivel creciente de nuevas tecnologías al servicio del pasajero y los nuevos sistemas utilizados en el ferrocarril, como la climatización, el servicio de información a los viajeros, los sistemas de detección y conducción de los trenes, están comenzando a cargar de forma significativa las subestaciones haciéndolas trabajar por encima de sus valores nominales, habiendo sido estas dimensionadas para cargas menores. Analizados los diferentes aspectos se necesita buscar un sistema de alimentación rentable para los sistemas de protección que permita solucionar los problemas expuestos. A partir del estudio de la problemática, unido a las políticas de eficiencia y ahorro energético trasladadas por ADIF al diseño de estas instalaciones, se propone el uso de la alimentación fotovoltaica como una medida que,

unida a las de un diseño más eficiente en consumo energético, provean a estas instalaciones de paso a nivel de un nivel de rentabilidad apropiado sin afectar ni a las exigencias de seguridad en la circulación ni a la disponibilidad de las mismas mejorando la fiabilidad y el mantenimiento.

Este trabajo abarca dos aspectos: de un lado se analiza la problemática de los sistemas de protección por pasos a nivel y del otro su alimentación por medio de tecnología fotovoltaica. Para una correcta planificación el tratamiento de todas las variables en juego se realiza por medio de una herramienta informática que permite primero calcular la energía necesaria para el funcionamiento de la instalación, y después dimensionar todos los elementos del sistema fotovoltaico (paneles, acumuladores, reguladores y protecciones). La automatización del proceso permite controlar las dos fases al mismo tiempo de modo intuitivo (user friendly), gracias a la interfaz grafica que ayuda al usuario a manejar todos los casos posibles y obteniendo al final del proceso una planificación de los elementos que se necesiten.

2. Modelización del paso a nivel

Se denomina paso a nivel a la intersección de una vía de tránsito por carretera no diferenciada en altura con una vía de ferrocarril.

Según hodierno Reglamento de la Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres (ROTT) [\[1\]](#) existen cinco clases de protección para los pasos a nivel:

- Clase A. Pasos a nivel sin guardería protegidos exclusivamente por señales fijas.
- Clase B. Pasos a nivel protegidos por señales luminosas y acústicas.
- Clase C. Pasos a nivel protegidos por semibarreras, doble semibarreras, o barreras automáticas o enclavadas.
- Clase D. Pasos a nivel protegidos en régimen de consigna.
- Clase E. Pasos a nivel protegidos por barreras o semibarreras con guardería a pie de paso.

Dependiendo de la configuración del paso a nivel que se quiera dimensionar, pueden estar presentes diferentes elementos [\[2\]](#) [\[3\]](#) [\[4\]](#) [\[5\]](#) [\[6\]](#):

- focos de carretera;
- generador acústico;
- barreras o semibarreras;
- señal peatonal;
- señales al ferrocarril;
- circuito de vía ISLA;
- pedales de aviso;
- módulo de mando;
- registrador;
- modulo de entradas/salidas.

Para poder modelar el funcionamiento de un paso a nivel se necesita definir un método que simule las operaciones del modulo de mando; este módulo tiene como tarea controlar y supervisar todo el sistema y en general se compone de dos microprocesadores que, utilizando las informaciones enviadas por los varios dispositivos de detección instalados a lo largo de la instalación, procura activar los elementos de protección [\[7\]](#).

Con el fin de determinar los tiempos de activación de los diferentes elementos de una configuración particular, y consecuentemente las potencias absorbidas por cada componente, se analiza una circulación diaria a través de paso a nivel. En este análisis se considera que algunos elementos como el modulo de mando, el registrador, los pedales electromagnéticos, el circuito de vía ISLA son cargas siempre activadas, mientras que todos los otros tienen un estado operativo y uno de reposo; las potencias consumidas a lo largo del día de consecuencia varían con respecto a la circulación ferroviaria. Como ejemplo se considere un paso a nivel protegido con semibarreras dobles. Los tiempos de activación para una serie de configuraciones se pueden ver en la Figura 1.

	t_0	t_1	t_2	t_1_bis	t_2_bis	t_3	t_4	t_3_bis	t_4_bis
Focos de Carretera	●	---	---	---	---	---	---	---	→
Señales Peatonales	●	---	---	---	---	---	---	---	→
Generador Acústico	●	---	---	---	→				
Señal Ferrocarril					●	→			
Bajada Semibarreras Entrada		●	→						
Bajada Semibarreras Salida				●	→				
Subida Semibarreras Salida						●	→		
Subida Semibarreras Entrada								●	→
Cargas siempre activas	●	---	---	---	---	---	---	---	→

Figura 1. Tiempos de activación de los equipos de una SBA dobles.

3. Modelización de la instalación fotovoltaica

El mejor dimensionamiento para una instalación fotovoltaica aislada es el que permite satisfacer los consumos de energía minimizando el número de módulos fotovoltaicos y de acumuladores. Además la correcta elección del sistema debe ser realizada para satisfacer los requisitos de seguridad de modo que la instalación de protección funcione también en las peores situaciones meteorológicas.

Para modelar la instalación se evalúan las estadísticas meteorológicas de las 52 provincias españolas como la irradiación media diaria, las temperaturas, el número máximo de días cubiertos a lo largo del año ^[8] ^[9]. Considerados estos valores se define un modelo que utilice el criterio del mes peor en el cual la relación irradiación solar/potencia consumida es la menor ^[10].

El método utilizado se puede resumir en la Figura 2

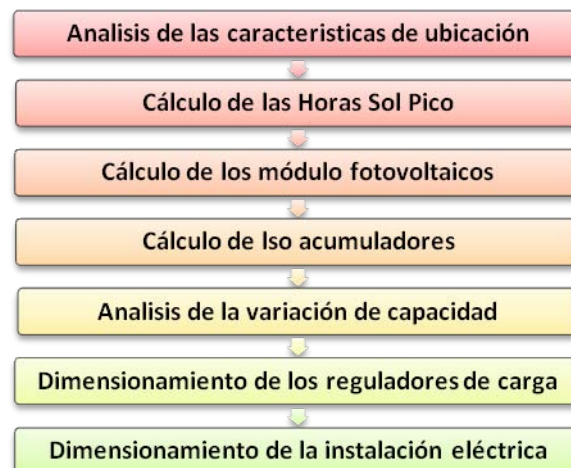


Figura 2. Etapas para la definición de la instalación fotovoltaica

4. Herramienta de dimensionamiento

La implementación de los métodos de cálculo se realiza con una herramienta software la cual presenta una interfaz gráfica dividida en 4 secciones que se pueden ver en la Figura 3:

- Configuración paso a nivel
- Cálculo consumo paso a nivel;
- Cálculo instalación fotovoltaica;
- Cálculos eléctricos.

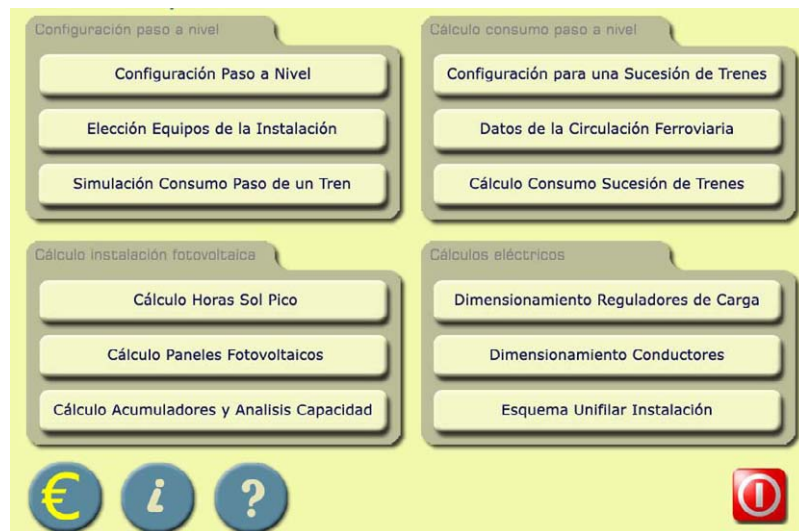


Figura 3. Máscara principal del software.

En el apartado de configuración del paso a nivel se introducen todos los datos relativos al paso a nivel: tipo y estructura, posición de las señales del ferrocarril, velocidades permitidas, longitud del paso a nivel, perfiles de entrada y salida (Figura 4).

Tipología de paso a nivel

Tipo de Paso a Nivel:

Tipo de Vía:

Longitud del Paso a Nivel: [m]

Distancia de los equipos del ferrocarril

Distancia desde la señal del ferrocarril hasta el paso a nivel: [m]

Configuración trazado lado A (Av A --> Eje PN)

Longitud tramo	Limitación de velocidad
<input type="text" value="2000"/> [m]	<input type="text" value="120"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]

Distancia total desde los puentes de aviso hasta el paso a nivel: [m]

Configuración trazado lado B (Av B --> Eje PN)

Longitud tramo	Limitación de velocidad
<input type="text" value="2000"/> [m]	<input type="text" value="120"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]
<input type="text" value="0"/> [m]	<input type="text" value="0"/> [km/h]

Distancia total desde los puentes de aviso hasta el paso a nivel: [m]

Figura 4. Máscara de configuración del paso a nivel.

Se introducen después los datos de los consumos de los diferentes elementos instalados y la circulación diaria a través del paso (Figuras 5 y 6).

Consumo Equipos de la Instalación SBA simple

Focos de Carretera en reposo (2 focos)	Si	20	[W]
Focos de Carretera activos (2 focos)	Si	100	[W]
Focos de Carretera en reposo (4 focos)	No		[W]
Focos de Carretera activos (4 focos)	No		[W]
Generador Acústico en reposo	Si	0.35	[W]
Generador Acústico activo	Si	11	[W]
Señales Peatonales en reposo	Si	13	[W]
Señales Peatonales activas	Si	120	[W]
Focos Ferroviarios en reposo (ambos sentidos de la vía)	Si	6.5	[W]
Focos Ferroviarios activos (ambos sentidos de la vía)	Si	100	[W]
Semibarreras en reposo (1 sentido)	Si	4.8	[W]
Semibarreras activas (1 accionamiento)	Si	240	[W]
Circuito de Vía (1 vía)	Si	5.5	[W]
Sistema de Detección (1 vía)	Si	31	[W]
Módulo de Mando	Si	10	[W]
Registrador	Si	7.5	[W]
Módulo entradas/Salidas	Si	8.5	[W]

Continuar

Figura 5 Potencias consumidas.

Datos de la Circulación Ferroviaria

Configuración de cada tren

Longitud del Tren: 300
 Situación del Paso: Protegido
 Definir al Tren antes del Paso a Nivel: No
 Tiempo de detención: 0.0 [s]
 Momento de Paso: 06 [h] 12 [m] 00 [s]
 Trazado: Lado A

Tren n°: 5/20

Datos generales del paso a nivel

Tipo de Paso a Nivel: SBA simple
 Tipo de Vía: Única
 Longitud del Paso a Nivel: 150 [m]
 Número Trénes: 20
 Longitud del trazado lado A: 2000 [m]
 Longitud del trazado lado B: 2000 [m]
 Distancia Señal Ferroviaria: 1000 [m]
 Aceleración: 0.6 [m/s²]
 Velocidad de Entrada: 120 [km/h]
 Velocidad de Salida: 120 [km/h]
 Saltar las barreras simultáneamente?: No

Cargar Guardar Continuar

Figura 6. Circulación diaria.

El programa, considerando un número de circulaciones diario introducido por el usuario, calcula la energía teórica consumida por el paso a nivel durante el día (Figura 7). El cálculo del consumo de energía teórica está determinada por el integrante del consumo instantáneo de energía eléctrica del sistema.

Cálculo de la energía teórica consumida

Nº tren	T_1	T_2	Ocupación	Vía
01	02:40:00	03:40:00	00:01:27	Lado A
02	03:15:00	03:16:16	00:01:16	Lado B
03	04:00:00	04:01:17	00:01:17	Lado A
04	05:30:00	05:31:12	00:01:12	Lado B
05	06:12:00	06:13:27	00:01:27	Lado A
06	06:48:00	06:51:17	00:01:17	Lado B
07	07:40:00	07:41:16	00:01:16	Lado A
08	08:22:00	08:24:12	00:01:12	Lado B
09	09:01:00	09:03:27	00:01:27	Lado A
10	10:31:00	10:33:27	00:01:27	Lado B
11	11:00:00	11:01:17	00:01:17	Lado A
12	12:30:00	12:31:27	00:01:27	Lado B
13	13:45:00	13:46:16	00:01:16	Lado A
14	14:20:00	14:21:12	00:01:12	Lado B
15	15:50:00	15:51:27	00:01:27	Lado A
16	16:22:00	16:24:17	00:01:17	Lado B
17	17:03:00	17:05:16	00:01:16	Lado A
18	18:30:00	18:32:27	00:01:27	Lado B
19	18:45:00	18:46:12	00:01:12	Lado A
20	22:30:00	22:31:16	00:01:16	Lado B

T_1: Instalador de detección de tren
 T_2: Instalador de paso del tren por el pedal de resaca

Continuar

Resumen de Energía Consumida:

- Focos de Carretera: I_{reposito} = 0.417 [A], I_{activo} = 2.003 [A], **Energía Consumida = 258.8 [Wh]**
- Generador Acústico: I_{reposito} = 0.029 [A], I_{activo} = 0.917 [A], **Energía Consumida = 18.9 [Wh]**
- Señales Peatonales: I_{reposito} = 0.542 [A], I_{activo} = 5 [A], **Energía Consumida = 363.8 [Wh]**
- Barreras: I_{reposito} = 0.4 [A], I_{activo} = 10 [A], **Energía Consumida = 290.4 [Wh]**
- Focos Ferroviarios: I_{reposito} = 0.271 [A], I_{activo} = 4.167 [A], **Energía Consumida = 188.7 [Wh]**
- Consumo 24h: I_{circulo de vía} = 0.229 [A], I_{pedales} = 1.262 [A], I_{entradas/salidas} = 0.354 [A], I_{módulo mando} = 0.417 [A], I_{registrador} = 0.313 [A], **Energía Consumida = 1503.4 [Wh]**
- Energía Total Consumida = 2.615 [kWh]**

Figura 7. Cálculo de la energía teórica consumida.

Por medio de la sección de la instalación fotovoltaica se calculan las Horas Sol Pico teniendo en cuenta la ubicación geográfica y eventuales condiciones de sombreado (Figura 8).

Datos Según Ubicación

MACRID: [dropdown]
 Latitud: 40° 22' 14" Norte, 3° 36' 33" Oeste
 Número Días Cubiertos Máximos: 18
 Tipo Atmosfera: Limpia (1.05)
 Inclinación Paneles (β): 50 (Optimo: Latitud + 18°)
 Ángulo de Azimut (α): 0 (Optimo: Latitud 0°)
 ¿Considerar eventuales sombras?: Si

Perfil del módulo

Coefficientes de Corrección de la Irradiación según la Ubicación

Criterio del Mes Peor (K): 1.7
 Variación Irradiación por Atmosfera (Ka): 1.05
 Pérdidas por Orientación e Inclinación (fβ): 1
 Pérdidas por Sombreado (fS): 1

Irradiación Diaria

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Irradiación Górnica [kWh/m²]	1.989	2.701	4.443	5.099	6.407	7.232	7.335	6.435	4.98	3.359	2.147	1.619
Horas Sol Pico [h]	3.55	4.821	7.931	9.102	11.597	12.909	13.093	11.486	8.889	5.996	3.832	2.89
Horas Sol Pico del Mes Peor	2.89											

Continuar

Figura 8. Cálculo Horas Sol Pico.

Con la energía teórica total y considerando las Horas Sol Pico se pueden dimensionar todos los elementos de la instalación fotovoltaica, como los paneles, los acumuladores y los reguladores de carga. Un ejemplo se puede ver en las Figuras 9, 10 y 11.

Cálculo Corriente de Diseño

Consumo Teórico Diario [kWh] 2.915
 Coeficiente de seguridad [%] 30
 Energía Real Diaria [Ah/día] 188.937
 Corriente de Diseño [A] 67.55
 Tipo de módulo Criterio
 Corriente de Diseño Corregida [A] 60.795

Cálculo Número Paneles Fotovoltaicos

Número Paneles en Serie 1
 Número Paneles en Paralelo 9
 Número Total Paneles 9

Figura 9. Cálculo módulos fotovoltaicos.

Características de la Instalación

Tensión de Servicio [V] 24
 Rendimiento de Conversión DC/DC $\eta_{dc} = 0.85$
 Rendimiento del Cableado $\eta_{ca} = 0.99$
 Rendimiento del Acumulador $\eta_{ba} = 0.9$
 Rendimiento Total de la Instalación $\eta = 0.75$

Datos Necesarios para el Cálculo

Número días Cubiertos 1 a 31
 Corrección por temperatura 0.45 a 1.05
 Profundidad de Descarga 0.4 a 0.9
 Energía Real Diaria [Ah/día] 188.937
 Tensión de Servicio [V] 24

Cálculo Acumuladores

Capacidad Banco Acumuladores Necesaria [Ah] 4723.42
 Acumuladores en Serie [N°] 2
 Ramas Paralelo [N°] 3
 Redundancia Sin Considerar
 Acumuladores Totales [N°] 6
 Capacidad Instalada [Ah] 5520
 Área Ocupada [m²] 0.51
 Peso Total del Banco de Acumuladores [kg] 888

Figura 10. Cálculo Acumuladores.

Datos Instalación

Número Total Paneles 9
 Paneles en serie 1
 Paneles en Paralelo 9
 Intensidad Cortocircuito Generador 70.74
 Intensidad Mínima Regulador 91.95

Datos Regulador

Código Regulador No Definido
 Intensidad Máxima de Entrada [A] 35

Cálculo Reguladores

Número Reguladores Calculados 3

Figura 11. Cálculo reguladores de carga.

El punto fuerte de la herramienta es la posibilidad de efectuar una simulación de la capacidad de acumulación de las baterías y de poder cambiar los elementos de la instalación ajustando el sistema según las necesidades. En este modo se puede evaluar si a lo largo del año el sistema de acumulación instalado puede garantizar una alimentación adecuada también en temporadas de baja irradiación solar. Un ejemplo se puede ver en la Figura 12.

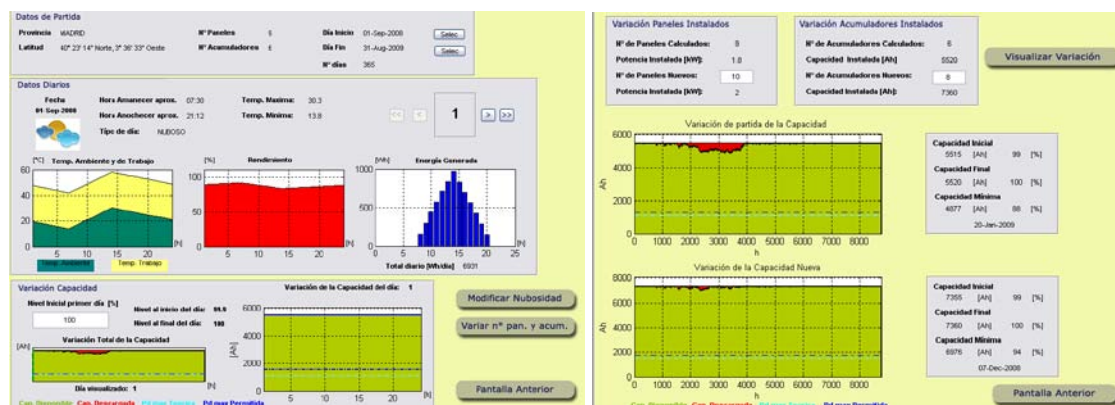


Figura 12. Ejemplo de simulación de la variación de capacidad.

5. Conclusiones

La Administración de la Infraestructura Ferroviaria en los últimos años se está orientando hacia la actuación en planes de ahorro energético, y una herramienta informática de este

género presenta una ayuda válida para una disminución de los consumos en el ámbito de los pasos a nivel. Además hay que tener en cuenta que en muchos casos la acometida de los pasos a nivel, sobre todo en zonas lejanas de los centros urbanos y de las líneas de transmisión y distribución de la energía eléctrica, tiene un coste considerable, y la aplicación de alimentación mediante energías renovables deviene, más que en una alternativa, en una obligación en aras de disminuir el coste de la infraestructura y las emisiones de efecto invernadero.

Considerando todas las especificaciones operativas de los sistemas de protección se puede decir que éstas se respetan y que el modelo del cálculo de la energía consumida por la instalación durante el día ofrece resultados que pueden ser aceptados, siendo estos muy cercanos a los valores generalmente medidos por operadores de diferentes infraestructuras ferroviarias. El cálculo de la instalación fotovoltaica se realiza del modo más completo posible considerando, además de las condiciones climáticas utilizadas en muchos métodos de cálculo, también las pérdidas por sombreado, que en algunas situaciones pueden ser significativas a la hora de la verificación del rendimiento del sistemas.

El software desarrollado es una aplicación sencilla de utilizar por cualquier técnico que tenga que enfrentarse con el problema del dimensionamiento del suministro de alimentación de todos los equipos necesarios para mantener la seguridad tanto en el ferrocarril como en la carretera que cruza la vía férrea. La implementación gráfica por medio de la librería GUI de MATLAB y el uso de programas de modificación de imágenes hace más intuitiva la introducción de los datos necesarios para el cálculo.

Bibliografía

[1] Reglamento de la Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres. Agosto 2001.

[2] Reglamento General de Circulación de RENFE. RENFE 1992.

[3] Especificación Técnica. Homologación y suministro de señales del ferrocarril. RENFE Enero 1997.

[4] Especificación Técnica. Homologación y suministro de destelleadores de pasos a nivel. RENFE. Enero 2000.

[5] Especificación Técnica. Homologación y suministro de accionamientos eléctricos de barreras para pasos a nivel. RENFE. Enero 2000.

[6] Suministro de sistemas detectores de tren por pedales electrónicos para instalaciones de seguridad en pasos a nivel. Mantenimiento de infraestructura RENFE.

[7] Suministro del modulo de mando electrónico para pasos a nivel. Mantenimiento de infraestructura Renfe . RENFE. Enero 2000.

[8] NASA Atmospheric Science Data Centre

[9] Agencia Estatal de Meteorología

[10] Sistemas Fotovoltaicos. Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaica. Miguel Alonso Abella. Era Solar 2005.